

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO TÍCH HỢP VÀ THỬ NGHIỆM TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THIẾT BỊ HÀN KIM LOẠI BẰNG LASER SỢI QUANG CÔNG SUẤT 500W

**Đỗ Xuân Tiến^{1*}, Đinh Văn Giang¹, Trương Đức Toàn¹, Phạm Chí Hiếu¹, Nguyễn Văn Bình¹,
Trần Thị Vân Anh¹, Cung Hồng Kiên¹**

¹Viện Ứng dụng công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ

**Tác giả liên hệ: dxtien@yahoo.com*

TÓM TẮT

Báo cáo trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo tích hợp nguyên mẫu của một hệ thống hàn kim loại bằng laser sợi quang tại phòng thí nghiệm ở Việt Nam. Hệ thống này bao gồm một nguồn phát laser sợi quang có công suất lối ra trên 500 W, bước sóng trung tâm 1070 nm, hoạt động ở chế độ liên tục hoặc phát xung điều biến ở tần số 5 kHz; kết hợp với một đầu hàn laser cầm tay và một hệ cấp dây hàn laser đường kính 1 mm. Các thành phần này được điều khiển đồng bộ và thiết lập thông số thông qua một giao diện người-máy (HMI) sử dụng màn hình cảm ứng, cho phép thực hiện quá trình hàn laser theo chế độ hàn điểm hoặc hàn quét tia với độ rộng vết hàn lên đến 2 mm. Ngoài ra, báo cáo này còn trình bày các kết quả thực nghiệm nhằm tối ưu hóa kỹ thuật hàn laser theo các thông số của nguồn phát laser, đầu hàn, hình dạng vết hàn và dạng ghép nối trên các loại vật liệu như thép carbon, thép không gỉ, và hợp kim nhôm với chiều dày dao động từ 0,5 mm đến 2 mm. Các thông số hàn laser tối ưu được sử dụng để triển khai thiết bị hàn laser trong các ứng dụng công nghiệp gia công cơ khí và sản xuất chế tạo máy.

Từ khóa: *Hàn laser, laser gia công kim loại, laser sợi quang.*

DESIGN, INTEGRATED FABRICATION, AND EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF OPERATING PARAMETERS FOR A 500W FIBER LASER METAL WELDING SYSTEM**ABSTRACT**

This paper presents the results of the research, design, and integrated fabrication of a prototype fiber laser metal welding system developed within a laboratory setting in Vietnam. The system comprises a fiber laser source with an output power exceeding 500 W, a center wavelength of 1070 nm, capable of operating in either continuous wave or modulated pulse mode at a frequency of 5 kHz. This source is coupled with a handheld laser welding head and an integrated laser wire feeder system for a 1 mm diameter filler wire. All components are synchronously controlled and their operating parameters configured via a Human-Machine Interface (HMI) with a touchscreen display. This configuration facilitates laser welding processes in either spot welding or seam/scan welding modes, achieving a weld bead width up to 2 mm. Furthermore, the report details experimental results aimed at optimizing the fiber laser welding technique. The studies focus on testing the parameters of the laser source, the welding head, weld bead geometry, and various joint configurations across a range of materials, specifically carbon steel, stainless steel, and aluminum alloys, with thicknesses varying from 0.5 mm to 2 mm. The optimized laser welding parameters derived from this research have subsequently been applied in the deployment of the laser welding equipment for industrial applications in the fields of mechanical processing and machine manufacturing.

Keywords: *Fiber laser, laser metal processing, laser welding*

Ngày nhận bài: 23/10/2025 Ngày nhận bài sửa: 03/11/2025 Ngày duyệt đăng bài: 10/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh sản xuất công nghiệp hiện đại, yêu cầu về các công nghệ hàn kim loại có độ chính xác cao, năng suất lớn và khả năng tự động hóa ngày càng gia tăng. Các phương pháp hàn hồ quang truyền thống như MIG, TIG hay hàn điểm điện trở, mặc dù đã được ứng dụng rộng rãi, vẫn bộc lộ một số hạn chế, đặc biệt ở các lĩnh vực đòi hỏi mỗi hàn có chất lượng ổn định, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ và khả năng hàn các chi tiết kích thước vi mô. Sự ra đời và phát triển của công nghệ hàn bằng laser sợi quang (fiber laser welding - FLW) đã mở ra một hướng đi mới, đáp ứng tốt hơn những yêu cầu này (Addanki, 2018).

Khác với các nguồn laser truyền thống (CO_2 , Nd: YAG), laser sợi quang sử dụng môi trường hoạt chất dạng sợi pha tạp Yb^{3+} kết hợp với công nghệ bơm diode bán dẫn, cho phép đạt hiệu suất chuyển đổi quang - điện cao, chất lượng chùm tia vượt trội và độ tin cậy vận hành lớn. Năng lượng laser được dẫn truyền qua sợi quang linh hoạt tới đầu hội tụ, tạo ra mật độ công suất cao để làm nóng chảy và liên kết kim loại theo hai cơ chế chính: hàn dẫn nhiệt (conduction mode) đối với mỗi hàn nông, và hàn xuyên sâu (keyhole mode) đối với mỗi hàn có chiều sâu lớn và tốc độ cao (Michalis N. Zervas, 2014; Mostafa Peysokhan, 2020). Các nghiên cứu và ứng dụng công nghiệp đã chỉ ra rằng phương pháp hàn kim loại bằng chùm tia laser mang lại nhiều ưu điểm nổi bật như: (i) tốc độ hàn cao, giảm đáng kể thời gian chu kỳ; (ii) mỗi hàn hẹp, vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ, hạn chế biến dạng chi tiết; (iii) hiệu suất năng lượng và tuổi thọ nguồn laser cao, giảm chi phí bảo trì; và (iv) khả năng tích hợp dễ dàng với robot và hệ thống điều khiển thông minh, phù hợp với xu hướng sản xuất thông minh. Tuy nhiên, công nghệ này cũng tồn tại một số hạn chế đáng lưu ý: chi phí đầu tư ban đầu cao, yêu cầu chuẩn bị bề mặt và gá kẹp chính xác, cũng như các thách thức về kiểm soát khuyết tật hàn (rỗ khí, bắn tóe, nứt nóng) trong điều kiện công suất lớn (Texas Instruments).

Trong vài năm gần đây, xu hướng phát triển của công nghệ hàn laser tập trung vào việc tăng công suất nguồn laser, tối ưu chất lượng chùm tia, phát triển hàn lai (laser-arc hybrid) để mở rộng khả năng hàn vật liệu dày, cũng như ứng dụng các cảm biến quang và trí tuệ nhân tạo nhằm giám sát và điều khiển quá trình theo thời gian thực. Đặc biệt, nhu cầu sản xuất xe điện, pin lưu trữ năng lượng và thiết bị điện tử công suất đã thúc đẩy sự mở rộng nhanh chóng của công nghệ hàn laser trong công nghiệp. Các lĩnh vực ứng dụng chính hiện nay của công nghệ hàn laser bao gồm các ngành gia công cơ khí và công nghiệp chế tạo dân dụng, công nghiệp ô tô, điện tử - vi cơ khí, thiết bị y tế, năng lượng tái tạo, sản xuất khuôn mẫu chính xác... Điều này cho thấy hàn kim loại bằng laser không chỉ là một giải pháp thay thế, mà còn trở thành một công nghệ cốt lõi trong sản xuất tiên tiến (VBsemi Electronics Co. Ltd, Yong Liu, 2013).

Tại Việt Nam hiện nay, công nghệ hàn kim loại bằng chùm tia laser đã được áp dụng và triển khai tại một số cơ sở sản xuất, xưởng gia công cơ khí với các thiết bị máy hàn laser hầu hết được nhập ngoại. Nhu cầu trong nước về các máy hàn bằng laser sợi quang vẫn là rất lớn. Điều này đặt ra những yêu cầu về thiết kế, chế tạo các thiết bị hàn laser phù hợp với điều kiện tại Việt Nam, cũng như thực hiện các nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu hóa công nghệ hàn laser trên vật liệu kim loại; từ đó giúp nắm bắt, làm chủ công nghệ và triển khai ứng dụng rộng rãi phương pháp hàn laser trong nước.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Các nội dung nghiên cứu trong báo cáo này tập trung vào việc thiết kế, chế tạo tích hợp hệ thiết bị hàn laser vật liệu kim loại với đầu hàn dạng cầm tay; xây dựng chương trình điều khiển hàn laser; ghép nối và điều khiển các khối bộ phận phụ trợ bao gồm: khối làm mát bằng nước, hệ cấp dây bù hàn và hệ thổi khí bảo vệ. Ngoài ra chúng tôi cũng trình bày các kết quả đo kiểm thông số của hệ thiết bị hàn

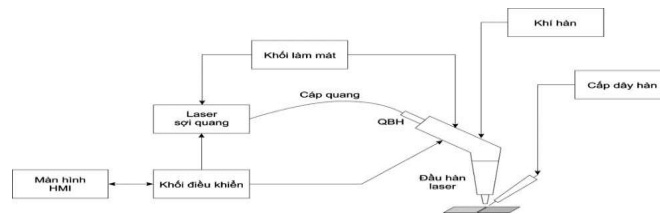
laser trong điều kiện phòng thí nghiệm của Việt Nam.

Tiếp theo là các nghiên cứu thử nghiệm và đánh giá đầy đủ các thông số ảnh hưởng đến quá trình hàn laser kim loại, gồm có: nguồn phát laser, đầu hàn, hình dạng vết hàn và dạng ghép nối trên các vật liệu kim loại như thép carbon, inox, nhôm. Quá trình này giúp tối ưu hóa các thông số hàn laser, phục vụ ứng dụng thiết bị trong các lĩnh vực gia công cơ khí, chế tạo máy, công nghiệp phụ trợ...

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thiết kế và chế tạo tích hợp thiết bị laser hàn kim loại

Quá trình thiết kế và chế tạo hệ thiết bị laser hàn vật liệu kim loại được thực hiện theo phương pháp tích hợp module, kết hợp các kinh nghiệm chế tạo laser nội bộ với việc đặt mua các khối bộ phận chuyên dụng từ các nhà cung cấp có uy tín toàn cầu. Mục tiêu của thiết bị là đáp ứng yêu cầu hàn các vật liệu kim loại với độ linh hoạt và hiệu suất cao. Sơ đồ thiết kế hệ thiết bị hàn kim loại bằng laser được thể hiện ở hình 1 dưới đây.

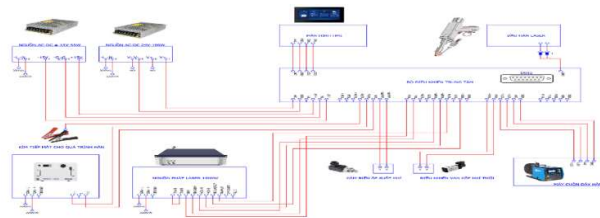


Hình 1. Sơ đồ tổng thể của thiết bị hàn laser với đầu hàn dạng cầm tay

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Cấu hình tổng thể của hệ thiết bị laser hàn kim loại bao gồm các khối bộ phận như: nguồn phát laser sợi quang bước sóng 1070 ± 10 nm, model RFL-C020H-CE của hãng Raycus (Trung Quốc); đầu hàn laser dạng cầm tay model BW101-GS của hãng Raytools (Thụy Sĩ); hệ thống tản nhiệt bằng nước có model RMFL-1500, hãng TEYU S&A; hệ cấp thổi khí hàn hỗ trợ các loại khí trơ như Argon, Nitơ với áp suất tối đa lên tới 8 bar; khối cấp dây hàn với đường kính dây 1 mm; hệ cấp điện động lực và điện điều khiển (hình 1). Các khối bộ phận này đều được kết nối và liên hệ chặt chẽ với nhau và được điều khiển đồng bộ từ một khối điều khiển trung tâm.

Quá trình điều khiển hoạt động của toàn bộ hệ thiết bị được thực hiện trên màn hình HMI với phần mềm điều khiển do chúng tôi tự thiết kế và xây dựng. Trên giao diện của màn hình cho phép thiết lập các thông số của hệ thống như: công suất laser, tần số xung, tốc độ quét tia laser, độ rộng của đường hàn, hình dạng điểm hàn... cùng các tùy chọn để điều khiển hệ thống cấp khí, cấp dây hàn laser. Ngoài ra màn hình điều khiển HMI cũng có chức năng lưu trữ các thông số hàn laser tối ưu cho từng loại vật liệu, điều này giúp tạo thuận lợi cho việc triển khai ứng dụng hàn laser trong thực tế sản xuất.



Hình 2. Sơ đồ thiết kế hệ cấp điện và điều khiển của thiết bị laser hàn kim loại

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Toàn bộ các module và bộ phận này của thiết bị hàn laser được lắp đặt trong một khung máy chắc chắn được chế tạo bằng nhôm định

hình, giúp đảm bảo sự ổn định trong quá trình hoạt động (hình 3).



Hình 3. Thiết bị laser hàn kim loại được hoàn thiện

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

3.2. Đo kiểm các thông số của hệ thống

Sau khi thiết kế, tích hợp và chế tạo hoàn thiện hệ thiết bị laser hàn kim loại, chúng tôi đã khảo sát và đo đạc một số thông số kỹ thuật chính của hệ thống tại phòng thí nghiệm của

đơn vị. Các thiết bị được sử dụng là: đầu đo công suất laser model BD10K-W và bộ hiển thị Nova II của hãng Ophir; đầu đo xung laser bằng photodiode model PDA10A-EC hãng Thorlabs kết hợp với dao động ký số TDS2024B của Tektronix (hình 4).



(a)



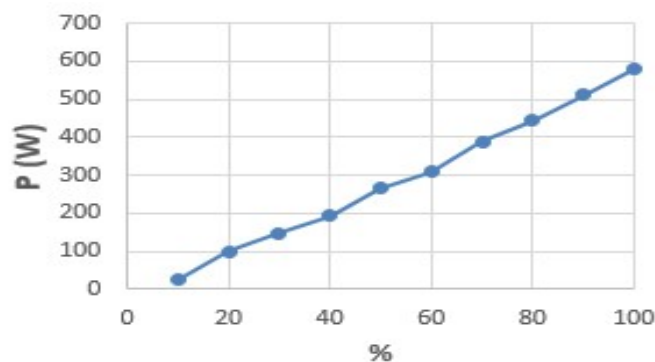
(b)

Hình 4. Các số liệu đo công suất laser (a) và tần số xung laser (b)

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

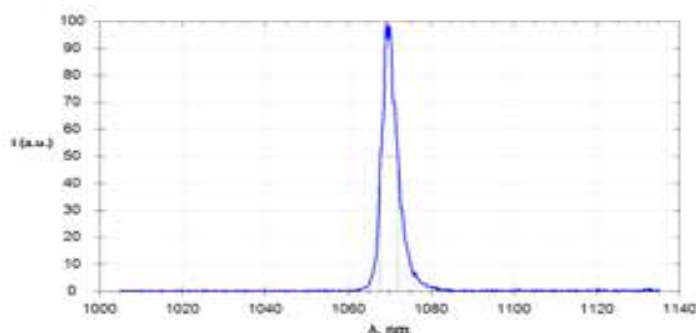
Từ các kết quả đo kiểm cho thấy: công suất laser lớn nhất đạt được là 580 W với giá trị độ rộng xung PWM đặt là 100% (hình 5);

tần số lặp lại của xung laser lồi ra có thể thay đổi được từ 1 ÷ 5000 Hz; và độ ổn định công suất laser ở mức < 5%.



Hình 5. Đồ thị công suất laser sợi quang lồi ra thay đổi theo % giá trị thiết lập

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả



Hình 6. Đồ thị phổ bước sóng lõi ra của laser sợi quang

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Bước sóng lõi ra của laser sợi quang được đo bằng máy phân tích phổ laser, model 721B-NIR của hãng Bristol Instruments. Kết quả cho thấy bước sóng laser trung tâm là 1070 ± 10 nm (hình 6). Hệ thiết bị laser hàn kim loại bước đầu đã được đo đạc và thử nghiệm các điều

kiện hoạt động ổn định, các thông số của hệ được trình bày ở bảng 1. Từ đó, có thể được sử dụng để nghiên cứu tối ưu hóa thông số và thử nghiệm kỹ thuật hàn bằng chùm tia laser trên một số loại vật liệu kim loại.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của hệ thiết bị laser hàn kim loại

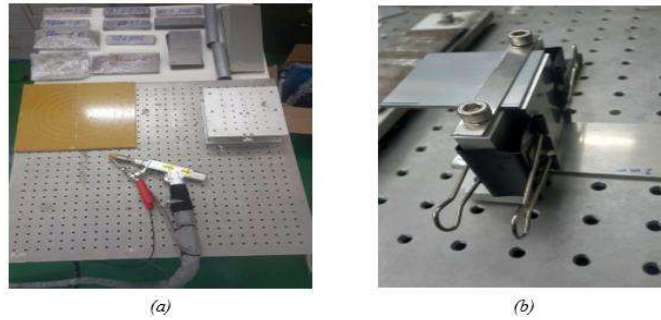
Loại laser:	Laser sợi quang
Bước sóng:	1070 ± 10 nm
Công suất laser lõi ra:	> 500 W
Chế độ hoạt động:	liên tục/ phát xung điều biến
Tần số lặp lại xung laser:	$1 \div 5000$ Hz
Laser chỉ thị:	Laser đỏ
Loại đầu hàn laser:	Dạng cầm tay
Chiều dài cáp quang đến đầu hàn:	5 m
Hỗ trợ khí hàn:	Nitơ, Argon
Hỗ trợ cấp dây hàn laser đường kính:	1 mm
Hệ làm mát:	Bằng dòng nước lưu chuyển
Nguồn điện:	220 V/50 Hz

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

3.3. Thử nghiệm và tối ưu hóa tham số hàn laser trên một số vật liệu kim loại

Sau khi đã thiết kế, chế tạo hoàn thiện hệ thiết bị laser hàn kim loại và phân tích cơ sở lý thuyết các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hàn laser, bước tiếp theo là tiến hành thử nghiệm thực tế nhằm kiểm chứng, đánh giá và lượng hóa tác động của các tham số công nghệ. Trong hàn kim loại bằng chùm tia laser sợi quang, chất lượng mối hàn không chỉ phụ thuộc vào đặc tính của nguồn phát (công suất laser, chế độ làm việc, bước sóng) mà còn bị chi phối bởi

các yếu tố quang học và cơ khí của đầu hàn (vị trí tiêu cự, kích thước điểm hội tụ, góc nghiêng, lưu lượng và loại khí bảo vệ) cũng như kỹ thuật và kinh nghiệm của người thao tác. Việc thử nghiệm trên các vật liệu điển hình như thép carbon, thép không gỉ (inox) và nhôm hợp kim giúp đánh giá toàn diện hơn, vì mỗi loại vật liệu có đặc tính hấp thụ, dẫn nhiệt và phản xạ tia laser khác nhau; từ đó tìm ra vùng thông số tối ưu cho từng loại vật liệu và giúp lựa chọn chế độ hàn laser phù hợp trong các ứng dụng công nghiệp.



Hình 6. Bố trí bàn thử nghiệm hàn laser (a) và một số mẫu gá vật liệu (b)

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Với mỗi bộ tham số thử nghiệm, chúng tôi đã tiến hành đánh giá mỗi hàn kim loại qua các tiêu chí:

- Quan sát bề mặt, kiểm tra độ sáng, màu sắc, độ đều của mỗi hàn.
- Đo tiết diện bằng cách cắt ngang mỗi hàn, chụp ảnh phóng to để đo chiều sâu, chiều rộng của mỗi hàn.
- Kiểm tra tính cơ học bằng cách tác động xung lực, uốn, bẻ cong...
- Phân tích khuyết tật như rỗ khí, nứt...
- Kiểm tra vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ).

Các mẫu kim loại (thép carbon, thép không gỉ, nhôm) thử nghiệm có kích thước 50 x 50 mm, chiều dày từ 0,5 mm đến 2 mm (hình

Thép carbon, mác CT3, chiều dày 2 mm:

6) và các tham số cố định của máy hàn laser, bao gồm: tốc độ hàn 10 mm/s; tốc độ cấp dây 8 mm/s; khí bảo vệ Argon 99,99%; lưu lượng khí 15 L/phút; góc đầu hàn laser là 100 so với phương vuông góc với bề mặt kim loại. Các tham số về công suất laser, vị trí điểm hội tụ, tần số xung... sẽ được thay đổi nhằm thu được sản phẩm hàn laser có chất lượng tốt nhất. Vết hàn laser được quan sát và đo kích thước bằng kính hiển vi kỹ thuật số DinoLite AD7013MZT với độ phóng đại hình ảnh từ 20x-230x và phần mềm DinoCapture 2.0 kèm theo.

Dưới đây là các kết quả thử nghiệm hàn laser tối ưu với mỗi loại vật liệu kim loại có chiều dày khác nhau:

Công suất laser (W)	Vị trí Điểm hội tụ (mm)	Tần số xung laser (Hz)	Tỷ số xung (%)	Nhận xét về vết hàn laser
400	-0.5	1000	100	Mặt trước đều đẹp. Độ xuyên thấu: 1,9 mm. Vùng ảnh hưởng nhiệt: 0,3 mm.

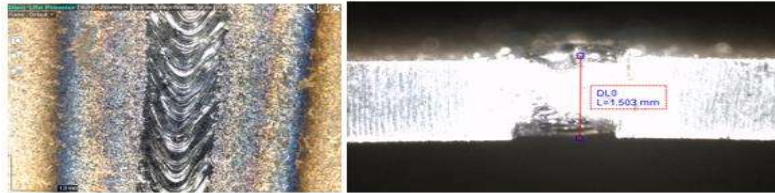


Hình 7. Vết hàn laser và độ sâu vết hàn của vật liệu thép carbon dày 2mm

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Thép không gỉ (inox), mác SUS 304, chiều dày 1,5 mm:

Công suất laser (W)	Vị trí Điểm hội tụ (mm)	Tần số xung laser (Hz)	Tỷ số xung (%)	Nhận xét về vết hàn laser
450	-0.5	1000	100	Độ phủ ở 2 mặt đẹp. Độ xuyên thấu: 1.5 mm. Vùng ảnh hưởng nhiệt: 1 mm. Chịu lực cơ học tốt. Không có rỗ khí, nứt.



Hình 8. Vết hàn laser và độ sâu vết hàn của vật liệu thép không gỉ dày 1,5mm

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Nhôm hợp kim, mác 6061, chiều dày 1 mm:

Công suất laser (W)	Vị trí Điểm hội tụ (mm)	Tần số xung laser (Hz)	Tỷ số xung (%)	Nhận xét về vết hàn laser
500	0.5	1000	100	Độ phủ ở 2 mặt đẹp. Độ xuyên thấu: 1.2 mm. Vùng ảnh hưởng nhiệt: 0.2 mm. Chịu lực cơ học tốt. Không có rỗ khí, nứt.



Hình 9. Vết hàn laser và độ sâu vết hàn của vật liệu nhôm dày 1mm

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Dựa trên các kết quả thử nghiệm hàn laser thực tế trên một số vật liệu kim loại, chúng tôi nhận thấy: Công suất laser tăng thì năng lượng xung và công suất đỉnh xung cũng tăng theo. Khi tăng công suất laser, độ sâu vết hàn sẽ tăng dần, và đến khoảng một nửa chiều dày của vật liệu sẽ bắt đầu hình thành khe rãnh hàn. Rãnh hàn này sẽ tiếp tục tăng dần cho đến khi vết hàn xuyên qua toàn bộ tấm vật liệu kim loại. Hình dạng vết laser hội tụ cũng thay đổi theo công suất laser chiếu tới. Thể tích vùng kim loại bị nóng chảy sẽ tăng lên khi năng lượng xung laser tăng, điều này cũng sẽ làm tăng sự biến dạng tại vị trí vết hàn laser. Vị trí vết laser hội tụ cũng có ảnh hưởng rất nhiều đến chất lượng

mỗi hàn laser. Với vết laser có kích thước lớn, mặt trên mỗi hàn có dạng đều hơn, tuy nhiên độ xuyên sâu của mỗi hàn là thấp. Khi vết laser hội tụ quá nhỏ, lúc này mật độ năng lượng laser trở nên rất lớn, do đó mỗi hàn sẽ bị cháy hỏng. Qua thử nghiệm trên, chúng tôi đã xây dựng được bảng các tham số hàn laser tối ưu của thiết bị trên một số vật liệu kim loại như trong bảng 2. Lưu ý, đây là các tham số đạt yêu cầu khi thử nghiệm tương đối độc lập với các tham số khác của hệ thống phụ trợ. Các tham số này sẽ được dùng để tham chiếu cho các bước thử nghiệm tiếp theo khi kết hợp với nhiều các tham số khác như: vận tốc bù dây, lưu lượng khí, vận tốc hàn.

Bảng 2. Thông số hàn laser tối ưu trên một số vật liệu kim loại

Vật liệu	Chiều dày (mm)	Công suất Laser (W)	Vị trí điểm hội tụ (mm)	Tần số xung laser (Hz)	Tỷ số xung (%)
Thép carbon	0.5	250	0	1000	80
Thép carbon	1	300	-0.2	1000	80
Thép carbon	1.5	330	-0.4	1000	100
Thép carbon	2	400	-0.5	1000	100
Inox	0.5	250	0	1000	100
Inox	1	350	-0.5	1000	100
Inox	1.5	400	-0.5	1000	100
Nhôm	0.5	400	-0.4	1000	100
Nhôm	1	500	-0.5	1000	100

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

4. KẾT LUẬN

Hàn vật liệu kim loại bằng chùm tia laser sợi quang là một giải pháp ưu việt hiện nay trong gia công và chế tạo cơ khí nhờ những ưu điểm như: vùng ảnh hưởng nhiệt nhỏ, tốc độ hàn nhanh, khả năng tập trung năng lượng cao, tạo ra mối hàn sâu và hẹp, ít biến dạng. Bên cạnh đó, laser sợi quang có ưu thế về độ ổn định, hiệu suất chuyển đổi điện - quang cao, kích thước nhỏ gọn và độ bền cao so với các loại laser khác. Dựa trên điều này, chúng tôi đã thiết kế và chế tạo một hệ thiết bị laser hàn kim loại sử dụng nguồn phát laser sợi quang bước sóng 1070 nm, công suất trên 500W với đầu hàn laser dạng cầm tay và màn hình cảm ứng HMI để điều khiển các thông số của hệ thống. Các kết quả thử nghiệm thực tế cho thấy hệ thiết bị máy hàn laser đã cho phép hàn tốt trên một số vật liệu kim loại như thép carbon, thép không gỉ, nhôm với chiều dày lên tới 2 mm theo các tham số tối ưu của nguồn phát laser và đầu hàn. Chúng tôi vẫn đang tiến hành thử nghiệm thêm các tham số liên quan đến tốc độ hàn laser, loại khí và áp suất khí bảo vệ, hình dạng vết hàn và đường ghép nối... từ đó có thể triển khai ứng dụng thiết bị trong thực tế sản xuất và gia công cơ khí.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ năm 2024-2025: “Nghiên cứu, tích hợp và thử nghiệm công nghệ hàn vật liệu kim loại

bằng thiết bị laser sợi quang công suất 500W”, do Trung tâm Công nghệ Laser - Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Addanki, S. I. (2018). Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. *Results in Physics*, 10, 743-750.
- Michalis N. Zervas, C. A. (September/October 2014). High Power Fiber Lasers: A Review. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 20.
- Mostafa Peysokhan, E. M. (2020). Analytical formulation of high-power Yb-doped double-cladding fiber laser. *OSA Continuum*, 3(7), 1940-1951.
- Texas Instruments. (kein Datum). TPS4005x Wide-Input Synchronous Buck Controller.
- VBsemi Electronics Co.Ltd. (kein Datum). NCEP0178AK: N-Channel 100-V (D-S) MOSFET.
- Yong Liu, L. L. (2013). Acousto-optic Q-switched pulse fiber laser with the peak power of 9kW. *Advanced Materials Research*, 760-762, 125-128.